

M-φ曲线在异形桥塔抗震验算中的应用

苑鹏宇

北京国道通公路设计研究院股份有限公司

DOI:10.32629/btr.v3i2.2893

[摘要] M-φ曲线是表征构件延性性能的特征曲线,在抗震分析中被广泛应用。对于常规结构M-φ曲线在抗震分析中主要用于三方面的计算。第一方面是计算桥墩的允许位移,第二方面是计算结构屈服后的等效屈服刚度,第三方面是计算多柱墩推导分析中的极限曲率。除此以外对于非规则桥梁M-φ曲线主要用于评价结构的弹塑性状态。本文涉及桥梁为自锚式悬索桥,桥塔出于景观考虑为异形结构。本例结合具体工程阐述M-φ曲线的计算原理,并对异形桥塔E2地震作用下的最大弯矩值进行验算。

[关键词] 自锚式悬索桥; 时程分析; M-φ曲线

1 M-φ曲线的计算原理

1.1 基本假设及主要计算思路

钢筋混凝土延性构件的塑性弯曲能力可以根据材料的特性,通过截面的轴力-弯矩-曲率分析得到,计算截面P-M-φ的基本假定为:

(1)平截面假定; (2)剪切应变的影响忽略不计; (3)钢筋和混凝土之间无滑移现象; (4)采用的钢筋和混凝土应力-应变关系。

截面的P-M-φ关系曲线通常可采用条带法计算。首先根据截面特性将截面划分为图1所示的条带。在划分条带时应将约束混凝土、无约束混凝土以及钢筋分别划分,其中各材料分别采用其自身的应力应变本构关系。

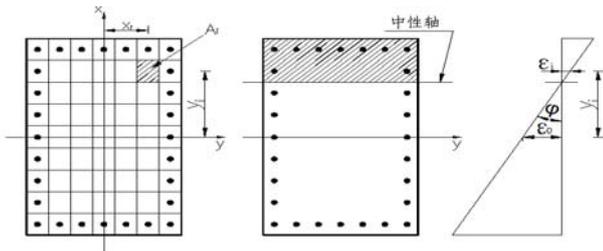


图1 计算简图

设φ表示截面曲率,形心轴的应变为ε₀,由平截面假定及图1所示计算简图,第i条带的应变为:

$$\epsilon_i = \epsilon_0 + \phi y_i \quad (式1)$$

计算出截面第i条带的应变后,可根据材料特性采用相应的本构关系求出其应力:

$$\sigma_i = \sigma_i(\epsilon_i) = \sigma_i(\epsilon_0 + \phi y_i) \quad (式2)$$

利用平衡条件可以得到:

$$P = \int_A \sigma dA = \sum_{i=1}^n \sigma_i(\epsilon_0 + \phi y_i) A_i \quad (式3)$$

$$M = \int_A \sigma y dA = \sum_{i=1}^n \sigma_i(\epsilon_0 + \phi y_i) y_i A_i \quad (式4)$$

给定轴力P由式3可求得ε₀,带入式4可求得M-φ关系。但一般很难求出M-φ关系,必须采用数值解法,迭代求解。可采用的迭代步骤如下:

(1)输入分析基本数据; (2)设定参考应变的初始值ε₀和初始受压区高度ZK(一般可取为截面高度的一半); (3)给参考应变提供一个微小的应变增量dε; (4)由式3计算截面轴力合力N1和弯矩M1; (5)判断计算轴力合力N1与外加轴力N是否平衡; (6)如果平衡则输出弯矩值和相应的曲率值; 如果不平衡,则调整受压区高度。当计算的轴力合力N1大于外加轴力时,降低受压区高度。反之增加受压区高度。受压区高度反复调整过程中可采

用二分法,它具有很高的收敛速度。(7)重复(2)~(6)步骤,直到达到规定的极限曲率。

1.2 材料本构应力应变关系

(1)约束混凝土一般采用mander本构,其应力应变关系如式5所示:

$$f_c = \frac{f'_{cc} x r}{r - 1 + x^r} \quad (式5)$$

式中:

$$x = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}} \quad (式6)$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{c0} [1 + 5(\frac{f'_{cc}}{f_{c0}} - 1)] \quad (式7)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (式8)$$

$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\epsilon_{cc}} \quad (式9)$$

上式中:

ε_{cc}—约束混凝土达到其抗压强度时的应变。

ε_{c0}—素混凝土达到抗压强度时的应变,一般取0.002。

f'_{cc}—素混凝土抗压强度,按规范表格可查。(注意0.85的修正系数)

E_c—混凝土初始弹性模量,按规范表格可查。

E_{sec}—约束混凝土在其约束抗压强度时的割线模量。

f'_{cc}—约束混凝土的抗压强度。

(2)无约束混凝土的应力应变关系如式10:

$$f_c = \begin{cases} f'_c \left[\frac{2\epsilon_c}{\epsilon_{c0}} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c0}} \right)^2 \right] & \epsilon_c \leq \epsilon_{c0} \\ f'_c \left[1 - 0.15 \left(\frac{\epsilon_c - \epsilon_{c0}}{\epsilon_u - \epsilon_{c0}} \right) \right] & \epsilon_{c0} < \epsilon_c \leq \epsilon_u \end{cases} \quad (式10)$$

式中 f'_c 和 ε_{c0} 分别为无约束混凝土圆柱体抗压强度及相应的纵向压应变(一般取0.002); ε_u 为极限压应变(一般取0.003到0.004)。

(3)钢材应力应变曲线一般采用双折线。具体关系如式11:

$$f_g = \begin{cases} \epsilon_g E_{1g} & (0 \leq \epsilon_g \leq \epsilon_y) \\ f_y + (\epsilon_g - \epsilon_y) E_{2g} & (\epsilon_g > \epsilon_y) \end{cases} \quad (式11)$$

式中 ε_y、f_y 分别为钢材的屈服应变及屈服强度。E_{1g}、E_{2g} 分别为钢材屈服前后的弹性模量。

2 工程概述及有限元模型

2.1 工程概述

本例索塔塔柱下部实体段(距塔底0~5m高度范围)采用直径28mm的HRB335钢筋为竖向受力主筋束。索塔塔柱内侧布置6排钢筋束,随高度其布置排数减少为3排。塔柱外侧布置4排钢筋束。塔柱两岸侧布置2排钢筋束。上述竖向受力主筋,均向下伸入索塔承台内锚固,锚固长度以到达索塔承台顶面以下3m为准。箍筋采用间距120mm直径20mm的HRB335焊接闭合环形箍筋。同时为控制大体积混凝土水化热引起混凝土胀缩,在实体内部配有纵、横、竖向间距为300mm的直径16mm的HRB335拉筋。塔柱及横梁采用C50混凝土。桥塔根部外形及配筋如下图2所示。

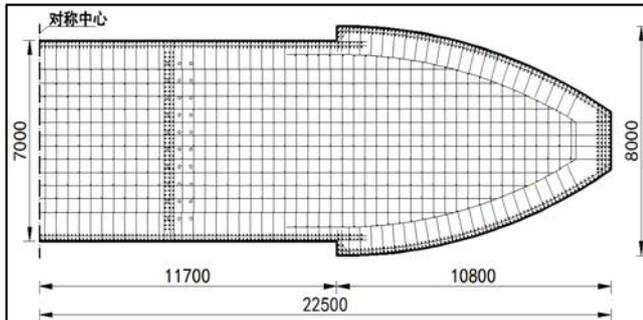


图2 异形桥塔断面图

2.2 材料本构关系核心参数取值

(1) 约束混凝土mander本构。

约束混凝土本构计算中的核心内容是计算约束混凝土的屈服强度值,由于异形截面没有既有公式计算其值,但本着约束混凝土的核心概念,可将异形截面等效为矩形截面,或直接选取截面中箍筋约束较弱区域作为计算其值的代表截面。

约束混凝土屈服强度计算表 (单位mm)

	横桥向	纵桥向
钢筋直径	12.0	12.0
面积	113.1	113.1
根数	52.0	16.0
总面积	5881.1	1809.6
边长	23400.0	7000.0
净距	55.2	55.2
dc/bc	23289.6	6889.6
箍筋竖向间距	240.0	240.0
体积配筋率	0.00105	0.00109
钢筋标准强度	335.0	335.0
有效测向约束应力	0.3	0.4
约束混凝土屈服强度	44.8	

(2) 无约束混凝土mander本构。

约束混凝土本构参数表 (单位mm)

28天抗压强度	约束强度	屈服应变	极限应变	弹性模量
42.5	44.84	0.01785	0.006	3.09E+04

无约束混凝土本构参数表 (单位mm)

28天抗压强度	屈服应变	极限应变	弹性模量
42.5	0.002	0.006	3.09E+04

(3) 钢材本构。

钢材本构参数表 (单位mm)

屈服强度	极限应变	弹性模量	强化系数
335	0.1	2.00E+05	1.00E-03

2.3 计算异形桥墩M-φ曲线

本桥地震效应采用安平报告提供的相关数据,计算所得桥塔地震力作用下根部弯矩如图所示:

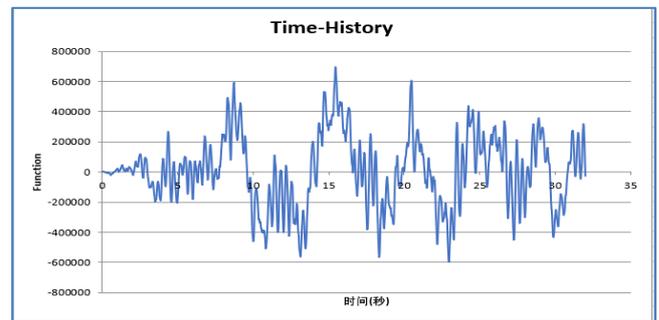


图3 塔根弯矩时程结果

其中在15.45s时取得最大弯矩 $1.388 \times 10^6 \text{ kNm}$,与之对应的轴力为 $3.54 \times 10^3 \text{ kN}$ 。

根据材料本构及时程计算所得内力,可得此桥塔根部截面的M-φ曲线如下图所示:

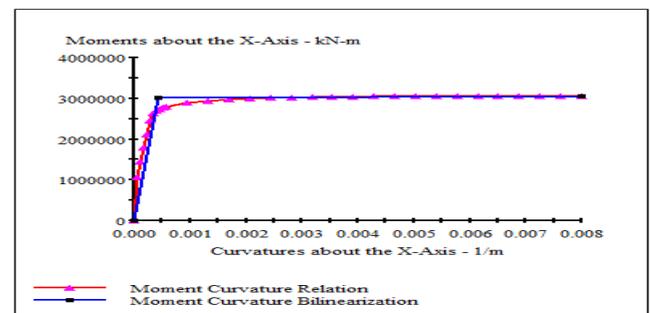


图4 M-φ曲线计算结果

主要计算结果如下表所示:

M-φ曲线计算结果表 单位(kNm)

首次屈服曲率	极限曲率	初始屈服弯矩
0.002794	0.007999	1.97E+06
极限弯矩	等效屈服曲率	等效屈服弯矩
3.07E+06	0.004272	3.01E+06

规范《公路桥梁抗震设计细则》9.4节条文说明中明确指出:在E2地震作用下,桥塔截面和桩基截面要求其在地震作用下的截面弯矩小于截面等效抗弯屈服弯矩。

本桥塔根部截面所受最大弯矩 $1.388 \times 10^6 \text{ kNm}$ 远小于M-φ曲线计算所得的 $3.01 \times 10^6 \text{ kNm}$ 弯矩。故本桥E2地震作用下桥塔的安全储备充足,满足E2地震作用下的抗震需求。

3 结论

(1) 弯矩曲率曲线的计算必须要考虑不同材料的本构关系。而对于非规则截面约束混凝土的抗压强度可取截面中相对约束较弱区域保守计算其值。(2) 地震作用下结构的内力随时间不断变化,计算弯矩曲率曲线时的轴力应取截面验算弯矩发生时的并发轴力。(3) 本例从计算结果不难发现,桥塔根部截面的安全储备充足,满足E2地震作用下的抗震需求。

[参考文献]

- [1] 范立础. 桥梁延性抗震设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [2] 范立础. 高架桥梁抗震设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [3] 公路桥梁抗震设计细则[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.